第64卷 第5期 天 文 学 报 Vol. 64 No. 5
2023年9月 ACTA ASTRONOMICA SINICA Sept., 2023

doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2023.05.005

CEMP星HE 1005-1439中子俘获元素天体物理来源的研究*

韩万强[1] 杨国超[2†] 牛 萍[1] 张 波[3‡]

(1 石家庄学院理学院 石家庄 050035)
(2 西华师范大学物理与天文学院 南充 637002)
(3 河北师范大学物理学院 石家庄 050024)

摘要 HE 1005-1439是一颗金属丰度极低([Fe/H] ~ -3.0)的碳增丰贫金属星(Carbon Enhanced Metal-Poor, CEMP), 该星的s-过程元素显著超丰([Ba/Fe] $= 1.16 \pm 0.31$, [Pb/Fe] $= 1.98 \pm 0.19$), 而r-过程元素温和超丰([Eu/Fe] $= 0.46 \pm 0.22$), 使用单一的s-过程模型和i-过程模型均不能拟合该星中子俘获丰度分布. 采用丰度分解的方法探究该星化学元素的天体物理来源可有助于理解CEMP星的形成和化学演化. 利用s-过程和r-过程的混合模型对其中子俘获元素的丰度分布进行拟合, 发现该星的中子俘获元素主要来源于低质量低金属丰度AGB伴星的s-过程核合成, 而r-过程核合成也有贡献.

关键词 恒星: 丰度, 恒星: 形成, 恒星: 化学组成特殊
中图分类号: P144; **文献标识码**: A

1 引言

由于库仑势垒作用, 越重的核素越难通过热核聚变反应产生, ^{56}Fe是结合能最大的原子核, 比铁族更重的元素由于结合能较低而库仑势垒较高, 故不能通过俘获带电粒子的核反应产生, 只能通过没有库仑势垒阻碍的中子俘获核合成产生[1]. 研究人员把比β衰变更慢的中子俘获过程称为慢中子俘获过程(s-过程), 比β衰变更快的中子俘获过程称为快中子俘获过程(r-过程), 二者各自贡献了宇宙中近一半的重元素. 通常把s-过程又分为弱s-和主要s-过程, 弱s-过程主要发生在大质量星的中心氦燃烧末期和碳壳层燃烧阶段, 主要产生较轻的中子俘获元素比如Sr、Y等[2–3]. Travaglio等[4]认为弱s-过程的贡献会随金属丰度降低而下降, 比如太阳系中只有10%的Sr来自弱s-过程. 但是考虑到旋转效应的影响, Frischknecht等[5]提出快速旋转大质量贫金属星能够有效地产生弱s-过程元素. 主要s-过程发生在中小质量星的渐近巨星支(Asymptotic Giant Branch, AGB)阶段, 可以有效产生所有的中子俘获元素[6]. 而r-过程也可以分为弱r-和主要r-过程, 弱r-过程可能发生在大质量星的核心塌缩超新星中[7], 主要产生较轻的中子俘获元素. 主要r-过程可以产生所有的中子俘获元素, 近几年来人们通过对引力波候选体GW 170817的观测和研究[8–9]指出主要r-过程元素会产生在中子星并合事件中, 但中子星

2022-07-26收到原稿, 2022-09-27收到修改稿

*河北省自然科学基金项目(A2018106014、A2019208194), 河北省高等学校科学研究项目(ZC2022090)及石家庄学院博士科研基金项目(21BS014)资助

†yanggc2010@126.com

‡zhangbo@hebtu.edu.cn

并合并不是唯一的场所. Yong等[10]对红巨星SMSS J200322.54–114203.3的元素丰度分布进行研究时发现, 中子星并合并不能完全拟合超贫金属星的丰度分布, 应该还存在其他发生r-过程的场所, 比如黑洞吸积盘[11]以及磁旋超新星[12]中等.

通常情况下, 贫金属星所在的星际介质只被少数核合成过程污染, 因此贫金属星的化学丰度中保留着银河系早期的化学特征, 故这些恒星是人们探究银河系早期化学演化的探针[13]. CS 22892-052 ([Fe/H] = −3.1)和CS 31082-001 ([Fe/H] = −2.9)是两颗极贫金属恒星, 它们的r-过程元素超丰([Eu/Fe] > 1.6), 人们通常把它们作为典型的主要r-过程星[14]. 这里我们定义

$$[A/B] = \lg(N_A/N_B)_* - \lg(N_A/N_B)_\odot\,,$$

N_A和N_B是元素A和B的原子数目, 下标"$*$"代表某颗恒星, "$\odot$"代表太阳. 元素A在恒星中的丰度表示为$\lg\varepsilon(A) = \lg(N_A/N_{\rm H}) + 12.0$. 同样, 极贫金属星HD 122563 ([Fe/H] = −2.77)和HD 88609 ([Fe/H] = −3.07)的轻中子俘获元素(Sr、Y等)相比重中子俘获元素(Ba、Eu等)超丰而被认为是典型的弱r-过程星[15–16]. Li等[17]和Hansen等[18]利用迭代的方法得到了主要r-过程分量丰度和弱r-过程分量丰度.

碳超丰贫金属星(Carbon Enhanced Metal-Poor, CEMP)一般被认为是[C/Fe] > 1.0的贫金属恒星, 在贫金属星中占有很大的比例, 特别是极贫金属端. CEMP恒星的元素丰度的多样性及形成机制的不明确使其成为一个研究热点[19]. Beers等[20]将CEMP星分了几类: CEMP-s星([Ba/Fe] > 1, [Ba/Eu] > 0.5)、CEMP-r星([Eu/Fe] > 1, [Ba/Eu] < 0)、CEMP-r/s星(0 < [Ba/Eu] < 0.5)和CEMP-no星([Ba/Fe] < 0). HE 1005-1439是一颗s-过程和r-过程都超丰([Ba/Fe] = 1.16 ± 0.31, [Eu/Fe] = 0.46 ± 0.22)的CEMP星([C/Fe] = 2.25 ± 0.27, [Fe/H] = −3.04 ± 0.15), 根据前面按中子俘获元素丰度的分类它应该属于CEMP-s星, Goswami等[21]用s-过程模型不能拟合该星的中子俘获元素丰度, 之后叠加了intermediate (i-)过程丰度才将该星的中子俘获丰度拟合, 但Pb元素并没有被拟合, 他们指出该星的Pb元素丰度比模型要低0.3–0.6 dex, 认为该星的重元素丰度中没有r-过程的贡献. 由于人们对于i-过程核合成的场所还没有确定的结论[22], Karinkuzhi等[23]认为低质量低金属丰度AGB星是i-过程产生的有效场所, 并用i-过程解释了多颗CEMP-r/s星的中子俘获元素丰度分布. 显然, HE 1005-1439的中子俘获元素丰度还有待于进一步的研究. 本文基于四分量模型(主要r-、弱r-、主要s-和弱s-), 利用参数化方法对该星的中子俘获元素丰度进行了分析研究. 本文的第2节是模型的描述和拟合计算, 第3节对丰度特征进行了分析和讨论, 最后给出了本文的结论.

2 模型和计算

为了研究恒星HE 1005-1439的中子俘获元素的天体物理来源, 假设该星中化学元素的丰度来自4个中子俘获核合成过程[24]:

$$N_i = (C_{\rm r,m}N_{i,\rm r,m} + C_{\rm r,w}N_{i,\rm r,w} + C_{\rm s,m}N_{i,\rm s,m} + C_{\rm s,w}N_{i,\rm s,w}) \times 10^{\rm [Fe/H]}\,, \quad (1)$$

其中$N_{i,\rm r,m}$、$N_{i,\rm r,w}$、$N_{i,\rm s,m}$和$N_{i,\rm s,w}$分别代表第i个元素的主要r-过程、弱r-过程、主要s-过程和弱s-过程的分量丰度底数, $C_{\rm r,m}$、$C_{\rm r,w}$、$C_{\rm s,m}$和$C_{\rm s,w}$表示4个相应分量的拟合系数. 由于s-过程增丰贫金属星的[Pb/hs]呈现出较大的弥散[25], 其中hs表示重s-过程元素(如Ba、La等), Straniero等[26]认为这需要用^{13}C-pocket效率的大小来解释. Bisterzo等[27]计算了低质量不同金属丰度AGB星在不同^{13}C-pocket效率下的产量, 包括了标准情况(ST)、ST/12、ST/18和ST/30, "ST"是Gallino等[28]提出的, 表示太阳系主要s-过程的丰度分布恰能被金属丰度为太阳二分之一的AGB星的s-过程产量解释[29]. 本文$N_{i,\rm s,m}$采用Bisterzo等[27]计算的AGB模型([Fe/H] = −2.6, $M = 2.0M_\odot$, $M_\odot$表示太阳质量), 选择该模型的ST/12情况, 并已归算到太阳系Ba元素的s-过程丰度[29]. 这些模型已被多个工作采用[24, 30–34], 具有可靠性. 我们使用文献[27]给出的所有主要s-过程理论丰度进行拟合, 也将选用ST/12与选用其他模型的结果进行了比较, 其中ST/12情况的拟合

是最佳的. 另外, 与其他模型相比较, ST/12模型的[Sr/Ba] = −0.84和[Ba/Pb] = −0.64与样本星的观测丰度比也是最接近的. 归算方法:

$$\lg N_{i,\mathrm{mod}} = \lg N_{i,\odot} + [X_i/\mathrm{Fe}]_{\mathrm{mod}} + [\mathrm{Fe/H}]_{\mathrm{mod}} \,, \quad (2)$$

式中$N_{i,\mathrm{mod}}$和$N_{i,\odot}$分别表示模型第i个元素的丰度和太阳的第i个元素的丰度, $[X_i/\mathrm{Fe}]_{\mathrm{mod}}$和$[\mathrm{Fe/H}]_{\mathrm{mod}}$表示模型给出的产量和模型的金属丰度.

$$N_{i,\mathrm{s,m}} = N_{i,\mathrm{mod}} N(\mathrm{Ba})_{\mathrm{s,m},\odot}/N(\mathrm{Ba})_{\mathrm{mod}} \,, \quad (3)$$

其中$N(\mathrm{Ba})_{\mathrm{s,m},\odot}$和$N(\mathrm{Ba})_{\mathrm{mod}}$分别是太阳系Ba元素的主要s-过程丰度和模型中Ba元素的丰度. Goswami等[21]通过计算发现该星的质量$\sim 0.8M_\odot$, 则其伴星的质量应大于$0.8M_\odot$, 在他们对该星的中子俘获元素丰度拟合的模型中, 利用$2.0M_\odot$的AGB模型与i-过程模型混合的拟合是最佳的. 我们在拟合计算中, 用r-过程分量与不同质量低金属丰度AGB星的产量模型叠加拟合该星的观测丰度时, 发现与观测丰度相比$1.3M_\odot$模型参与的拟合结果中Sr的理论丰度偏低(~ 0.3 dex), 而Pb的理论丰度偏高(~ 0.3 dex); $1.5M_\odot$模型参与的拟合结果中, Sr的理论丰度偏高(~ 0.4 dex), 而Eu和Pb的理论丰度均偏低(~ 0.3 dex); $2.0M_\odot$的AGB模型参与的拟合结果显示Sr、Ba、Eu和Pb等的观测丰度都能被理论丰度很好地拟合, 因此我们选用了$2.0M_\odot$的模型. 计算中Ba和La元素丰度选用的是文献[21]表2中带星号"⋆"的, 因为利用光谱综合的方法得到的丰度更可靠些. $N_{i,\mathrm{r,m}}$和$N_{i,\mathrm{r,w}}$采用Li等[17]计算的结果, 弱s-过程的Sr、Y和Zr丰度$N_{i,\mathrm{s,w}}$采用Raiteri等[2]给出的产量. 一般认为弱s-过程核合成主要对轻中子俘获元素有贡献[2–3], 因此, 本工作将重中子俘获元素(Ba、Eu和Pb)的弱s-过程分量设为0. 此分量模型已在多个工作中采用[24, 30–32, 35], 具体元素的各个分量的取值情况见表1, 其中Z为原子序数, 太阳系的元素丰度值取自文献[36].

通过反复比较恒星元素丰度的观测数据与计算值, 寻找最小的χ^2就可以确定(1)式中分量系数的最佳值, χ^2由下式确定:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{K} \frac{(\lg N_{i,\mathrm{obs}} - \lg N_{i,\mathrm{cal}})^2}{(\Delta \lg N_{i,\mathrm{obs}})^2 (K - K_{\mathrm{free}})} \,, \quad (4)$$

其中$N_{i,\mathrm{cal}}$表示样本星中第i个元素的计算丰度值, 取自(1)式; $N_{i,\mathrm{obs}}$表示该星第i个元素的观测丰度值; $\Delta \lg N_{i,\mathrm{obs}}$表示观测数据的不确定度; K表示该星观测数据中中子俘获元素个数; K_{free}是分量系数的个数, 这里为4. 元素的观测丰度及其不确定度取自文献[21]. 最佳拟合结果为$\chi^2 = 1.29$、$C_{\mathrm{r,m}} = 1.4$、$C_{\mathrm{r,w}} = 0$、$C_{\mathrm{s,m}} = 20.3$、$C_{\mathrm{s,w}} = 0$. 图1给出了计算结果与观测的对比, 可以看出该星的中子俘获元素丰度是由s-过程主导的, 但r-过程也有小部分的贡献, 而来自大质量星的弱r-过程和弱s-过程对该星的化学丰度基本没有贡献. 拟合计算结果与观测数据在误差范围内是相符的. Pb元素被r-过程和s-过程的混合较好地拟合了, 这说明该星中的Pb丰度主要来源于低质量低金属丰度AGB星的贡献, r-过程对Pb丰度也有微弱的贡献.

表 1 元素的各个分量取值情况

Table 1 The component abundances of each element

Element	Z	$N_{i,\mathrm{r,m}}$	$N_{i,\mathrm{r,w}}$	$N_{i,\mathrm{s,m}}$	$N_{i,\mathrm{s,w}}$
Sr	38	66.60	129.66	88.82	73.33
Y	39	7.57	21.15	27.80	11.26
Ba	38	32.10	0.85	125.81	0.00
La	38	3.64	0.05	12.21	0.00
Ce	38	7.59	1.36	40.07	0.00
Pr	38	1.98	1.12	3.55	0.00
Nd	38	10.94	0.60	20.67	0.00
Eu	38	2.86	0.00	0.32	0.00
Dy	38	12.12	0.00	3.41	0.00
Er	38	8.34	0.00	2.86	0.00
Hf	38	3.11	0.00	5.43	0.00
Pb	38	23.77	0.00	385.28	0.00

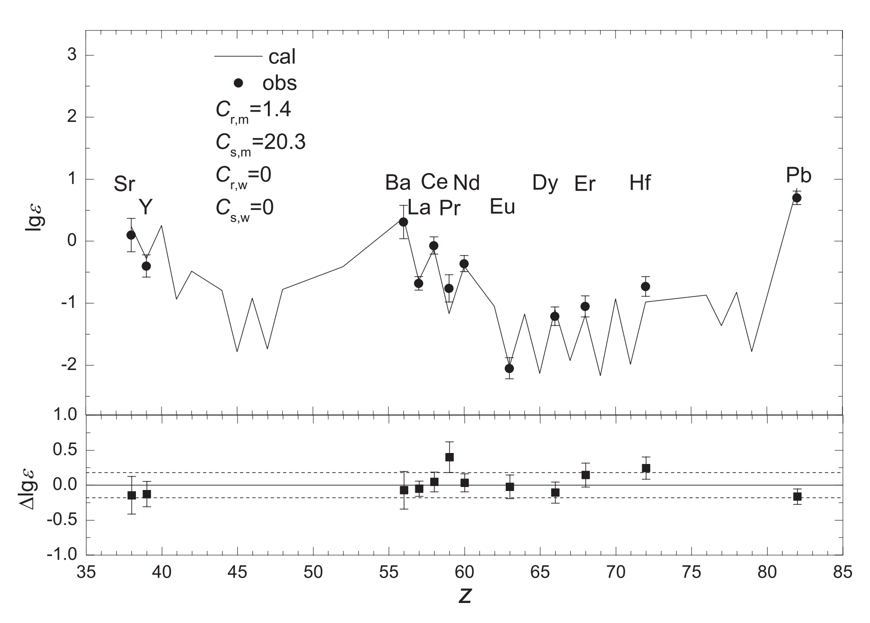


图 1 对HE 1005-1439的中子俘获元素丰度的拟合图. 图的上部分中, 带有误差棒的实心圆代表样本星的观测数据, 取自文献[21], 实线表示计算的结果. 图的下部分中, 实心方块代表拟合结果的误差$\Delta\lg\varepsilon=\lg N_{i,\rm obs}-\lg N_{i,\rm cal}$, 虚线表示观测误差的平均值.

Fig. 1 The best fit of the abundance patterns of the neutron-capture elements for HE 1005-1439. In the upper panel, the filled circles with error bars represent the observed data of the sample from Ref.[21], while the solid line represents the calculation results. In the lower panel, the squares refer to the relative offsets: $\Delta\lg\varepsilon=\lg N_{i,\rm obs}-\lg N_{i,\rm cal}$, and the dashed lines are the averages of the observed uncertainties.

3 分析与讨论

Goswami等[21]提出使用主要s-过程和i-过程混合才能较好地拟合样本星的中子俘获元素丰度分布, 但是观测显示, 主要s-过程和i-过程都与AGB星有关[23, 37–38], 如果叠加使用这两个过程就可能重复使用了AGB星的贡献. 为了进一步探究各个核合成过程对该恒星丰度的影响, 我们计算了该星中子俘获元素的分量丰度比并在图2中表示出来. 图中$[X/{\rm H}]_k=\lg(C_kN_{i,k})-\lg X_{i,\odot}+[{\rm Fe/H}]$, 其中$k$表示某个中子俘获过程(比如主要r-、弱r-、主要s-和弱s-过程), C_k表示某个中子俘获过程的拟合系数, $N_{i,k}$是第i个元素的某个中子俘获过程的分量丰度底数. 从图中我们发现对中子俘获元素丰度起主要贡献的是低质量AGB星的主要s-过程, 特别是对Ba、Pb等元素, 主要r-过程的贡献比s-过程的贡献要低得多, Ba元素丰度有大约98.3%来自主要s-过程, 它的s-过程分量丰度比r-过程分量丰度高约1.8 dex, Pb元素的s-过程分量丰度比r-过程分量丰度高约2.4 dex, 而对于Eu元素, r-过程的贡献占38.1%, s-过程的贡献占61.9%, r-过程分量丰度比s-过程分量丰度低约0.25 dex.

Straniero等[26]指出^{13}C-pocket效率存在的较大弥散会导致s-过程增丰贫金属星的[Pb/hs]在观测上呈现出很大的弥散, 而且当金属丰度[Fe/H] $\leqslant -1.3$时, [Pb/hs]会高于1.0. 在图3中我们对比了HE 1005-1439与部分CEMP星的[Pb/Ba]与[Fe/H]的关系, 我们发现[Pb/Ba]的离散趋势随着金属丰度的增加而减小, 这说明在金属丰度极低端有利于Pb元素的产生, 而随着金属丰度的升高, 更有利于Ba等中子俘获元素的产生. HE 1005-1439位于线性拟合的趋势线附近, 说明该星的[Pb/Ba]丰度比符合总体的丰度增丰趋势. 图4给出了[Pb/Eu]与[Ba/Eu]的比较情况, 我们发现整体呈现出线性增加的趋势. 一般情况下, 我们认为Eu元素主要来自于r-过程贡献, 是典型的r-过程元素. 但由于HE 1005-1439是一颗CEMP-s星, 且处于双星系统, 因此其Ba和Eu等中子俘获元素可能主要来自于双星的物质交流, 其伴星已经历过AGB过程和剧烈

的热脉冲过程，产生的中子俘获元素(包括Eu)被吸积到该星表面，根据本文的计算结果，来自伴星的贡献约占该星Eu元素的62%. 另外，该星也有38%的Eu来自于r-过程，这些Eu元素可能来自于该星形成时所在的母体气体云，即该星的母体气体云有被r-过程事件污染的历史，而后在演化过程中吸积伴星抛出的s-过程物质，Ba、Pb等元素丰度都出现逐渐增加的趋势，从而呈现出现在的丰度观测特征.

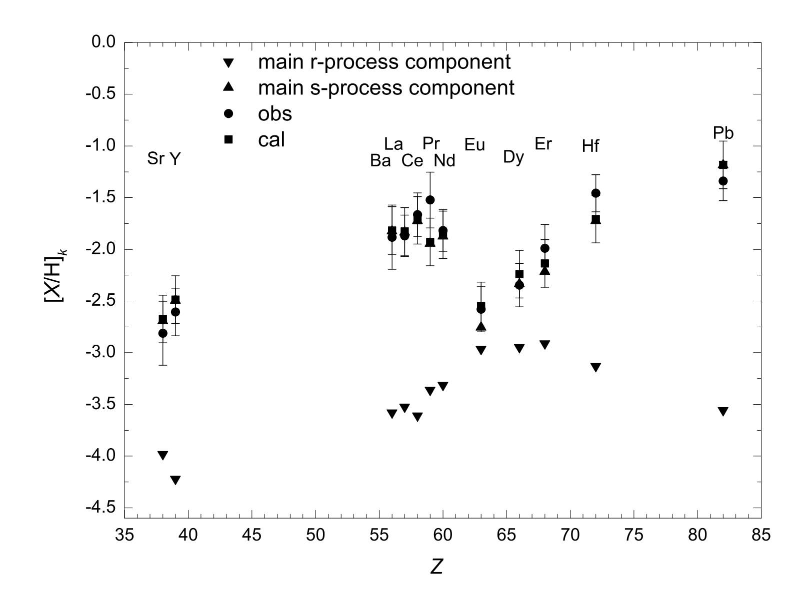


图 2 样本星中子俘获元素分量丰度比的对比图. 带有误差棒的实心圆代表该星的观测数据，带有误差棒的实心方块表示计算值. 计算结果的不确定度采用观测数据误差的平均值来表示. 实心三角表示主要s-过程分量丰度，实心倒三角代表主要r-过程分量丰度.

Fig. 2 Comparison of the component abundance ratios of the neutron-capture elements for the sample stars. The filled circles with the error bars represent the data of the sample, and the filled squares with the error bars represent the calculations. The calculated uncertainties are adopted with the average uncertainty of the observed abundances. The s-process component abundances are represented as the filled triangles, and the filled down triangles represent the r-process component abundances.

4 结论

本文利用s-过程和r-过程的混合模型对CEMP恒星HE 1005-1439的中子俘获元素丰度分布进行了拟合，拟合的结果是: $\chi^2 = 1.29$、$C_{\mathrm{r,m}} = 1.4$、$C_{\mathrm{s,m}} = 20.3$. Goswami等[21]用基于理论模型的参数化方法，采用s-和i-过程两个分量很好地拟合了该星的大多数中子俘获元素，但他们认为该星的Pb丰度([Pb/Fe] = 1.98)比模型计算的结果低0.3到0.6 dex，不能被很好地拟合. 而本文也是用参数化方法，采用不同的理论模型对该星的元素丰度拟合. 计算结果显示Pb的观测丰度在误差范围内与计算结果相接近，说明该星的Pb元素可以被AGB核合成和r-过程的组合拟合. 而分量计算显示Pb的s-过程分量贡献达到99.6%，说明AGB核合成主导了该星的Pb元素的产生，也就是说该星的Pb元素主要来自其伴星. Goswami等[21]在2002–2003年间曾多次对HE 1005-1439的视向速度进行观测，发现其视向速度的大小有很大的变化，这从动力学角度证明其为双星. 另外，碳同位素比^{12}C/^{13}C是研究AGB核合成很有用的探针. Karakas等[41]研究发现AGB核合成的^{12}C/^{13}C值与恒星初始质量有关，而且依赖于第3次挖掘发生的次数，对于小质量的恒星，^{12}C/^{13}C比值可以超过100，在低金属丰度下甚至超过1000. 而该星的^{12}C/^{13}C ($\sim$ 5)值远小于内禀

AGB, 这也再次证明该星应属于双星系统, 且还没有演化到AGB阶段, 其s-过程元素可能主要来自其经历过AGB阶段的白矮星伴星. 因此, HE 1005-1439的中子俘获元素主要来源于低质量低金属丰度AGB伴星的s-过程核合成.

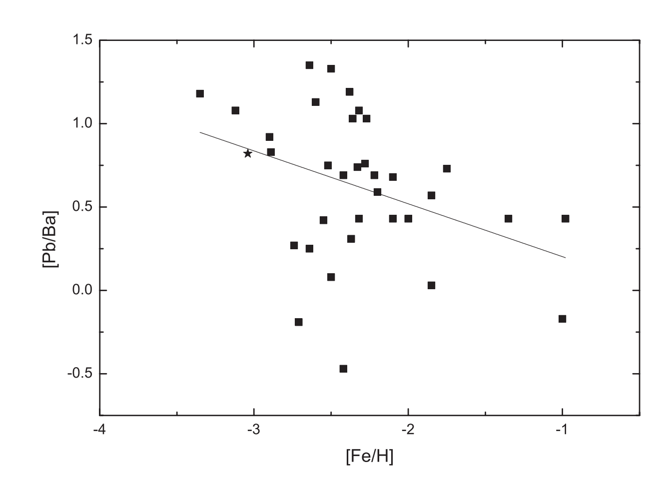


图 3 [Pb/Ba] vs. [Fe/H]分布图. 实心方块代表CEMP星的数据, 数据来自文献[23, 39–40]. 实心五角星为HE 1005-1439[21], 实线为线性拟合线.

Fig. 3 The distribution of [Pb/Ba] vs. [Fe/H]. The filled squares represent the data of the CEMP stars, which are from Refs. [23, 39–40]. The filled star is HE 1005-1439[21]. The straight line is the linear fit result.

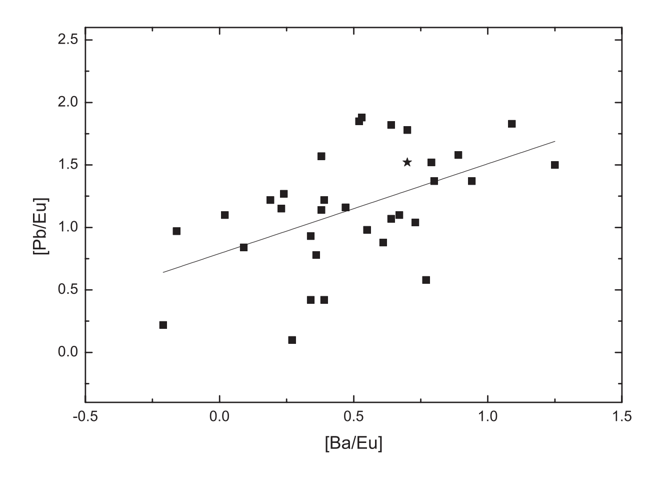


图 4 [Pb/Eu] vs. [Ba/Eu]分布图. 数据表示同图3.

Fig. 4 The distribution of [Pb/Eu] vs. [Ba/Eu]. Symbols are the same as in Fig. 3.

致谢 非常感谢审稿人对文章提出的建设性意见和建议, 使得文章质量有了显著的提高.

参 考 文 献

[1] Burbidge E M, Burbidge G R, Fowler W A, et al. RvMP, 1957, 29: 547

[2] Raiteri C M, Gallino R, Busso M, et al. ApJ, 1993, 419: 207

[3] Travaglio C, Gallino R, Arnone E, et al. ApJ, 2004, 601: 864

[4] Travaglio C, Galli D, Gallino R, et al. ApJ, 1999, 521: 691

[5] Frischknecht U, Hirschi R, Thielemann F K. A&A, 2012, 538: L2

[6] Busso M, Gallino R, Wasserburg G J. ARA&A, 1999, 37: 239

[7] Qian Y Z, Wasserburg G J. PhR, 2007, 442: 237

[8] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. ApJ, 2017, 848: L12

[9] Watson D, Hansen, C J, Selsing, J, et al. Nature, 2019, 574: 497

[10] Yong D, Kobayashi C, Da Costa G S, et al. Nature, 2021, 595: 223

[11] Siegel D M, Barnes J, Metzger B D. Nature, 2019, 569: 241

[12] Reichert M, Obergaulinger M, Eichler M, et al. MNRAS, 2021, 501: 5733

[13] Frebel A. ARNPS, 2018, 68: 237

[14] Sneden C, Cowan J J, Gallino R. ARA&A, 2008, 46: 241

[15] Honda S, Aoki W, Ishimaru Y, et al. ApJ, 2007, 666: 1189

[16] Montes F, Beers T C, Cowan J J, et al. ApJ, 2007, 671: 1685

[17] Li H J, Shen X J, Liang S, et al. PASP, 2013, 125: 143

[18] Hansen C J, Montes F, Arcones A. ApJ, 2014, 797: 123

[19] Sharma M, Theuns T, Frenk C S, et al. MNRAS, 2018, 473: 984

[20] Beers T C, Christlieb N. ARA&A, 2005, 43: 531

[21] Goswami P P, Goswami A. A&A, 2022, 657: A50

[22] Goriely S, Siess L, Choplin A. A&A, 2021, 654: A129

[23] Karinkuzhi D, Van Eck S, Goriely S, et al. A&A, 2021, 645: A61

[24] Li H J, Cui W Y, Zhang B. ApJ, 2013, 775: 12

[25] Busso M, Gallino R, Lambert D L, et al. ApJ, 2001, 557: 802

[26] Straniero O, Gallino R, Cristallo S. NuPhA, 2006, 777: 311

[27] Bisterzo S, Gallino R, Straniero O, et al. MNRAS, 2010, 404: 1529

[28] Gallino R, Arlandini C, Busso M, et al. ApJ, 1998, 497: 388
[29] Arlandini C, Käppeler F, Wisshak K, et al. ApJ, 1999, 525: 886
[30] Niu P, Liu W, Cui W, et al. MNRAS, 2014, 443: 2426
[31] Han W Q, Zhang L, Yang G C, et al. ApJ, 2018, 856: 58
[32] Han W Q, Zhang L, Yang G C, et al. RAA, 2020, 20: 10
[33] Cui W Y, Shi J R, Geng Y Y, et al. Ap&SS, 2013, 346: 477
[34] Cui W Y, Zhang B, Shi J R, et al. A&A, 2014, 566: A16
[35] Niu P, Cui W Y, Zhang B, et al. PASP, 2015, 127: 51
[36] Anders E, Grevesse N. GeCoA, 1989, 53: 197
[37] Lugaro M, Campbell S W, Van Winckel H, et al. A&A, 2015, 583: A77
[38] Herwig F, Pignatari M, Woodward P R, et al. ApJ, 2011, 727: 89
[39] Gull M, Frebel A, Cain M G, et al. ApJ, 2018, 862: 174
[40] Jonsell K, Barklem P S, Gustafsson B, et al. A&A, 2006, 451: 651
[41] Karakas A I, Lattanzio J C. PASA, 2014, 31: e030

The Astrophysical Origins of Neutron-captue Elements in CEMP Star HE 1005-1439

HAN Wan-qiang[1] YANG Guo-chao[2] NIU Ping[1] ZHANG Bo[3]
(1 Science College, Shijiazhuang University, Shijiazhuang 050035)
(2 School of Physics and Astronomy, China West Normal University, Nanchong 637002)
(3 College of Physics, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024)

Abstract HE 1005-1439 is a Carbon Enhanced Metal-Poor (CEMP) star with [Fe/H] ~ -3.0, which is significantly enhanced in elements produced by slow neutron-capture process (s-process; e.g., [Ba/Fe] = 1.16 ± 0.31, [Pb/Fe] = 1.98 ± 0.19) and mildly enhanced in elements produced by rapid neutron-capture process (r-process; e.g., [Eu/Fe] = 0.46 ± 0.22). The neutron-capture element patterns of the star can not be fitted by the s-process model or intermediate process (i-process) model. Studying the astrophysical origins of chemical elements in the star based on the method of abundance decomposition can help understanding the formation and evolution of the CEMP stars. Fitting the abundance patterns of the neutron-capture elements in this star with the combination of s- and r-process patterns, we found that the neutron-capture elements of the star are mainly produced by the s-process of the companion AGB stars with low mass and low metallicity, and the r-process nucleosynthesis also contributes a little to this star.

Key words stars: abundances, stars: formation, stars: chemically peculiar